第39卷 第5期
2022年9月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 39 No. 5
Sep. 2022

DOI:10.13866/j.azr.2022.05.03

三江源区积层混合云微物理特征机载观测试验研究

韩辉邦[1,2], 张玉欣[1,2], 郭世钰[1,3], 唐文婷[1,2]

(1. 青海省气象灾害防御技术中心,青海 西宁 810000; 2. 青海省人工影响天气办公室,青海 西宁 810000;
3. 青海省防灾减灾重点实验室,青海 西宁 810000)

摘 要: 利用在三江源区开展的飞机云物理探测试验数据,对2020年9月13日三江源泽库地区一次积层混合云宏微观物理特征及对流泡特征进行分析。结果表明:(1) 积层混合云内温度在-23~-10 ℃之间,相对湿度为90%~100%,液态过冷水在0.04~0.70 g·m⁻³之间;(2) 对流泡内平均粒子数浓度高于周边层云10¹ L⁻¹,平均有效粒子半径更大,平均液态过冷水为0.28 g·m⁻³,高于层云约0.03 g·m⁻³,粒子数浓度与液态过冷水有较好的对应关系;(3) 云粒子谱呈多峰型分布,峰值出现在50 μm、400 μm和1000 μm,符合典型高云的分布特征;(4) 积层混合云中粒子多为聚合状冰晶粒子,部分高度层存在少量六角板状和线状冰晶,云内以淞附增长和聚并增长机制为主,对流泡内存在凝华增长,云内降水机制符合"播撒-供给"机制。

关键词: 机载探测; 云微物理特征; 积层混合云; 对流泡; 三江源

积层混合云由层状云和嵌入其中的对流云组成,生命期较长,是我国北方主要降水云系,也是实施飞机人工增雨的主要目标云系[1-5]。自20世纪70年代起,国内外先后开展了一系列针对积层混合云系的飞机探测研究[6-8]。Evans等[9]研究发现,嵌入层状云中的对流单体液态含水量更高,上升速度更强,能够产生更多的冰晶;范烨等[4]研究北京地区积层混合云结构发现,大粒子分布较均匀,小粒子在对流区内外差距较大,对流区内浓度大尺度小;张佃国等[10]研究环北京地区积层混合云微物理结构特征发现,云粒子谱在高层为单峰谱,底层为双峰谱,降水粒子在不同高度均为单峰谱;朱士超等[5]研究发现,华北地区积层混合云中观测的液水含量呈不均匀分布,最大值可达1.5 g·m⁻³;王元等[11]分析河北地区积层混合云飞机探测资料发现,嵌入式积云区温度低于周围层云区,含水量分布不均且大于层云区;亓鹏等[12]研究华北太行山东麓积层混合云中对流泡和融化层结构特征发现,在含有高过冷水含量的对流泡中,冰粒子增长主要是聚并和淞附增长,而在过冷水含量较低的云区以聚并增长为主;刘香娥等[13]研究北京地区积层混合云垂直结构发现,云中冰晶形状主要有板状、针柱状、辐枝状和不规则状,冰晶的聚合是云中粒子增长的主要过程;高茜等[14]研究发现,华北地区积层混合云中层云区和积云区冰粒子形状和形成过程有明显差别,层云区的粒子形状组成比较复杂,包含针状、柱状和辐枝状等,而积云区主要以辐枝状粒子为主,聚并、淞附过程明显。

三江源地处青藏高原腹地,是长江、黄河、澜沧江的发源地,是我国淡水资源的重要补给地,同时也是亚洲、北半球乃至全球气候变化的敏感区和重要启动区[15-17]。受地理位置和气候特征等影响,高原地区云系结构及物理特征与平原地区有很大差异。目前,国内已有学者开展了一些针对高原云物理特征的相关研究,徐祥德等[18]认为,青藏高原中小尺度对流泡较多,并对应着窄长的上冲热泡;傅云飞等[19]利用TRMM卫星资料研究发现,高原降水云团多呈零散块状的水平分布,降水存在塔状分布特征;常祎等[20]研究青藏高原夏季对流云发现,受高原加热效应影响,对流云在11:00发展,17:00—18:00

收稿日期: 2022-02-18; **修订日期:** 2022-06-07
基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0104);国家自然科学基金(42165008);青海省基础研究计划(2020-ZJ-711)共同资助
作者简介: 韩辉邦(1987-),男,高级工程师,主要从事云降水物理研究. E-mail: hmjerry@163.com
通讯作者: 张玉欣. E-mail: nuistzyx@126.com

达到最强；王黎俊等[21]研究三江源秋季层积云增雨催化试验的微物理响应发现，云粒子中值直径集中在3.5~18.5 μm，直径21.5~45.5 μm的云粒子基本为冰晶。但受观测手段等因素限制，三江源地区云物理相关研究较少，因此，开展三江源及青藏高原地区云物理及云降水特征研究，将有助于掌握该地区降水形成演变规律，对提升高原山区空中云水资源开发利用率、提高天气预报和人工影响天气水平具有重要意义，同时也可为保护高寒湿地生态环境及水源涵养提供必要的数据支撑。本研究利用"第二次青藏高原综合科学考察研究"项目在三江源区开展的飞机云物理探测试验数据，对2020年9月13日三江源泽库地区一次积层混合云宏微观物理特征进行研究，揭示该地区积层混合云系的微物理结构和降水形成机制，为科学有效开展人工增雨作业提供支撑。

1 仪器和资料

1.1 飞机探测资料

探测平台为空中国王350飞机搭载的云物理探测系统，该系统包括：(1) 飞机综合气象要素测量系统AIMMS(Aircraft Integrated Meteorological Measurement System)，用于测量温度、湿度、风速、风向和飞行轨迹等；(2) 云粒子图像探头CIP(Cloud Imaging Probe)，测量范围25~1550 μm，共分62档，分辨率为25 μm，用于探测冰晶和大云滴，并输出二维图像，本文将CIP探测的云粒子简称为CIP粒子；(3) 热线含水量仪LWC(Hotwire Liquid Water Content)，测量范围0.01~3.00 $g \cdot m^{-3}$，用于探测云中液态含水量。探测仪器经国内专业机构定期标定，每次飞行前定时维护，设备运行稳定，数值质量可靠。

为减少仪器带来的误差，参考Field等[22]处理方法，剔除CIP数据第一档观测值，同时，由于CIP原始数据为图像数据，利用美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research，NCAR)开发的数据分析系统SODA (The System for OAP Data Analysis)对二维图像数据进行处理。粒子图像校正使用Shattering Correction方法，该方法基于粒子到达时间进行粒子破碎校正，详见文献[22]。探测飞行时对LWC进行晴空无云标定，以保证获取精确的云内液态含水量。

1.2 飞行概况

1.2.1 研究区概况　研究区青海省黄南藏族自治州泽库县(101°28′14″E，35°02′19″N)位于三江源东部黄河上游第一弯处，海拔3662 m，为高原大陆性季风气候，属高原亚寒带湿润气候区，年平均气温−0.7 ℃，年平均降水量548 mm且分布不均，是黄河上游地区重要的水源涵养地和产流区。研究区水汽资源丰富，20世纪90年代在该地区开展过一些人工增雨科学试验，取得了初步的研究成果[23-26]。历年气象观测资料表明，三江源地区降水云系主要为蔽光高层云，受高原复杂地形影响，系统前期常伴随出现地形积云，形成积层混合云降水，并由中小尺度天气引发形成强对流云性降水。此外，原属于稳定性降水的层积云，却经常演化为积云，并伴随蔽光高层云和地形积云出现，形成较大的降水[27]。因此，积层混合云是三江源地区主要降水云系，也是开展人工增雨作业的主要目标云系。本研究所选飞机探测云系为三江源区典型降水天气系统积层混合云，具有一定的典型性。研究区地形及实际飞行航迹见图1。

1.2.2 天气背景　由图2可知，9月12—13日，由西亚大槽分离的高原槽沿35°N东移，结合北部东移南压的北槽，在青藏高原东部形成大范围降水。在13日高原槽逐渐移出，探测时500 hPa高空为低压槽后，风向为偏西风。云系主要位于观测区以东，观测区在飞机观测时由不均匀的混合云系覆盖。

1.2.3 飞行概况　飞机飞行时间为2020年9月13日08:53—11:29(北京时，下同)，总飞行时间2 h 13 min。探测时间为09:40—10:30，探测区域云系为积层混合云，探测高度7850~6600 m，共平飞探测5层(7850 m、7500 m、7200 m、6900 m、6600 m)，总探测时长50 min，获取2161个样本数据，本次飞行线路及探测航线见图3。

2 积层混合云分布特征

2.1 云宏微观物理量时间演变特征

图4为探测时段内温度(T)、高度(Altitude)、相对湿度(RH)和液态含水量(LWC)随时间变化图，探测时间内T位于−23~−10 ℃之间，RH在90%~100%，LWC在0.04~0.70 $g \cdot m^{-3}$之间。T和LWC随高度降低逐渐升高。RH在7850~6900 m相对稳定在100%，在7200 m和6900 m飞机下降阶段波动较大，原因可能是下降过程中飞机速度和倾斜角度超过AIMMS测量量程所带来的误差。RH在6600 m平飞探测阶段变化较为剧烈，在90%~97%之间，对流泡中LWC

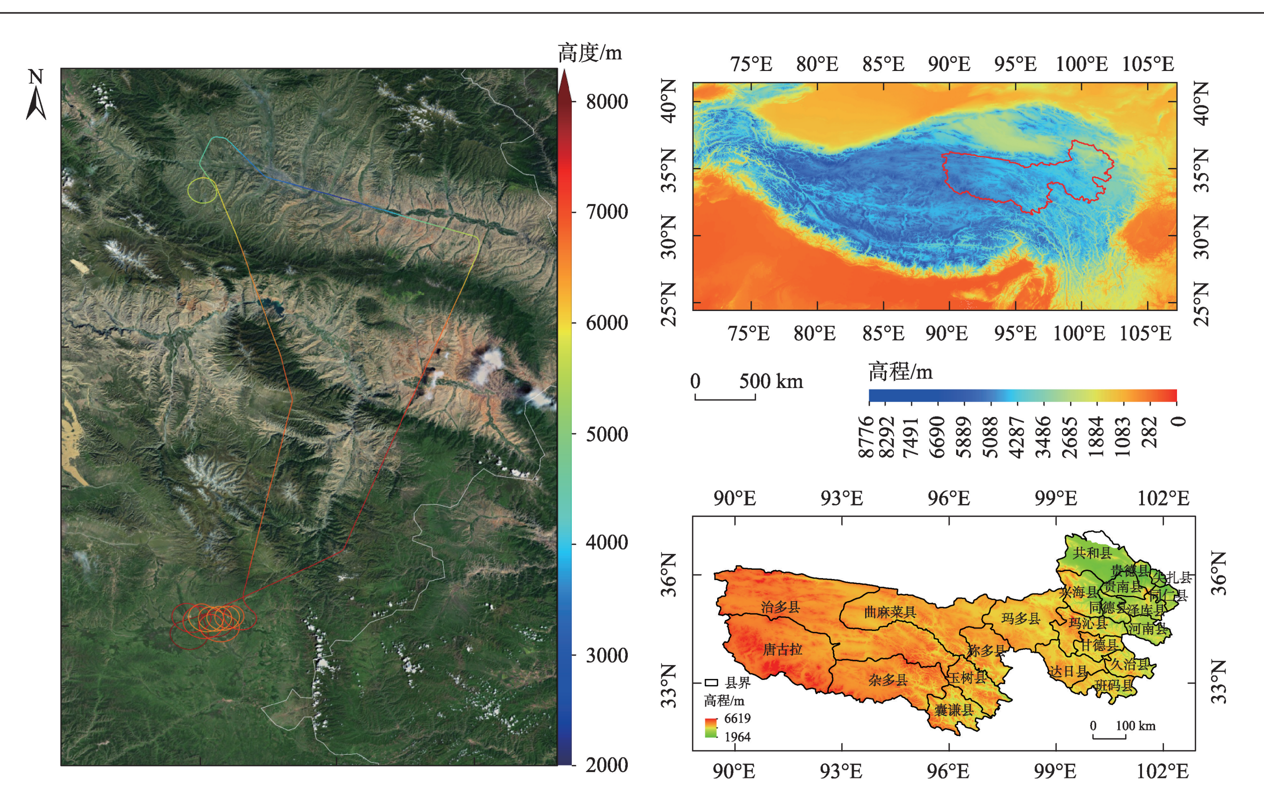
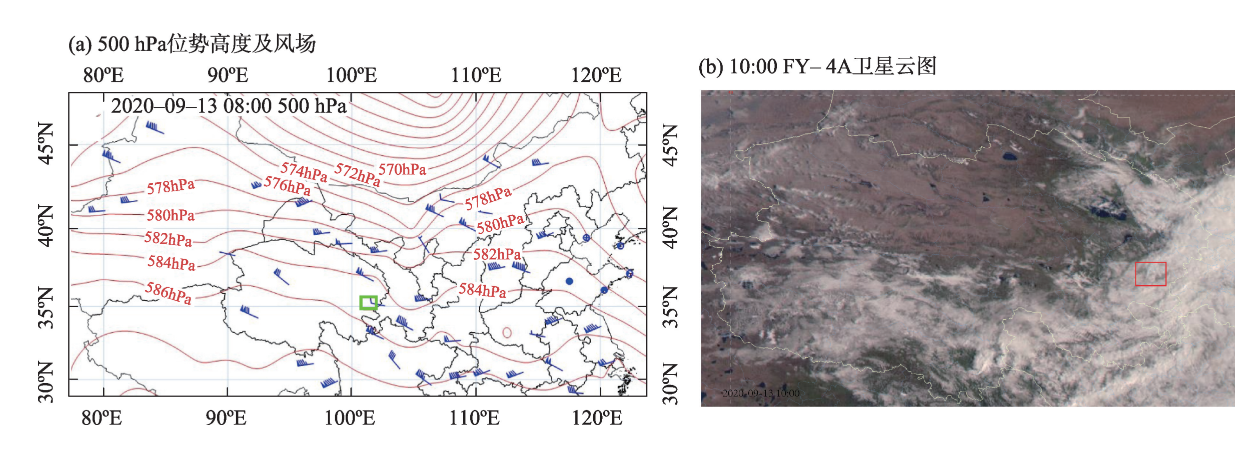


图1 研究区及飞行航迹图

Fig. 1 Study area and flight path trajectory



注：图a中绿框和图b中红框为观测区域。

图2 2020年09月13日08:00 天气背景

Fig. 2 Weather background at 08:00 on 13 September 2020

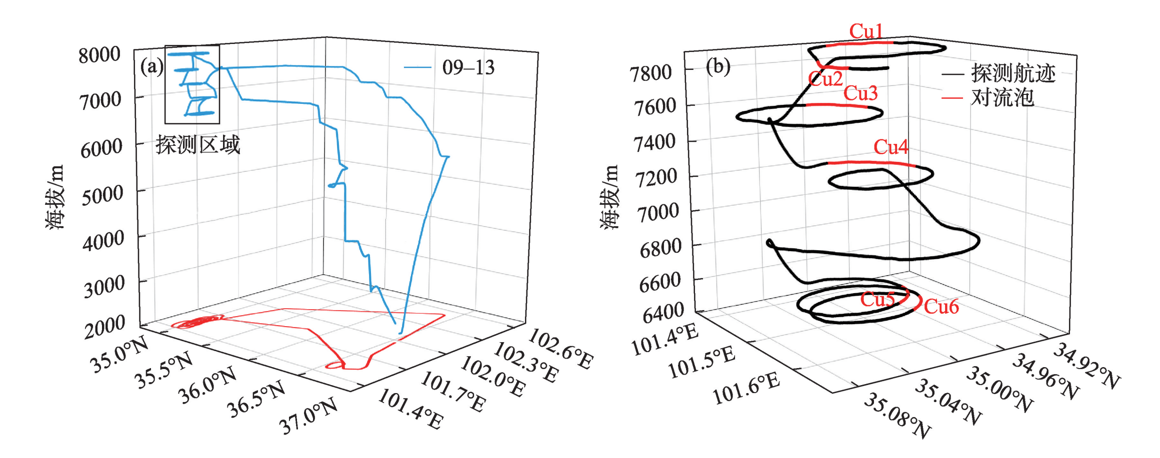
明显高于其他区域。

2.2 云垂直分布特征

图5a、图5b分别给出了飞机垂直探测阶段平均云粒子浓度(CIP)、LWC、T和云粒子在各粒径的浓度谱。T变化较均匀且随高度下降而升高，在6900 m时存在明显的逆温现象。LWC随高度下降而升高，下层减少趋势较为明显。云粒子谱在7200~6900 m之间存在明显的高值区域，主要原因为此时段内飞机探测处于对流泡中，而其他下降阶段处于层云中，这也是导致LWC和T在7200~6900 m高度上差异明显的原因。云粒子浓度在10^1~10^2 L^{-1}左右，飞行高度在7200~6900 m时，云粒子直径集中在500 μm以下，高度低于6900 m时，云中可见较大粒子，粒子直径集中在500~900 μm之间。

2.3 云中对流泡分布特征

图6给出了不同飞行高度上LWC、RH、云粒子数浓度(ND)、有效粒子半径(ED)和云粒子(D)在不同粒径下的浓度谱分布。图6a为7850 m高度，实际



注：Cu1、Cu2、Cu3、Cu4、Cu5、Cu6为积层混合云云中对流泡位置。

图3　飞行航迹(a)和探测轨迹(b)

Fig. 3　Flight path trajectory (a) and detection trajectory (b)

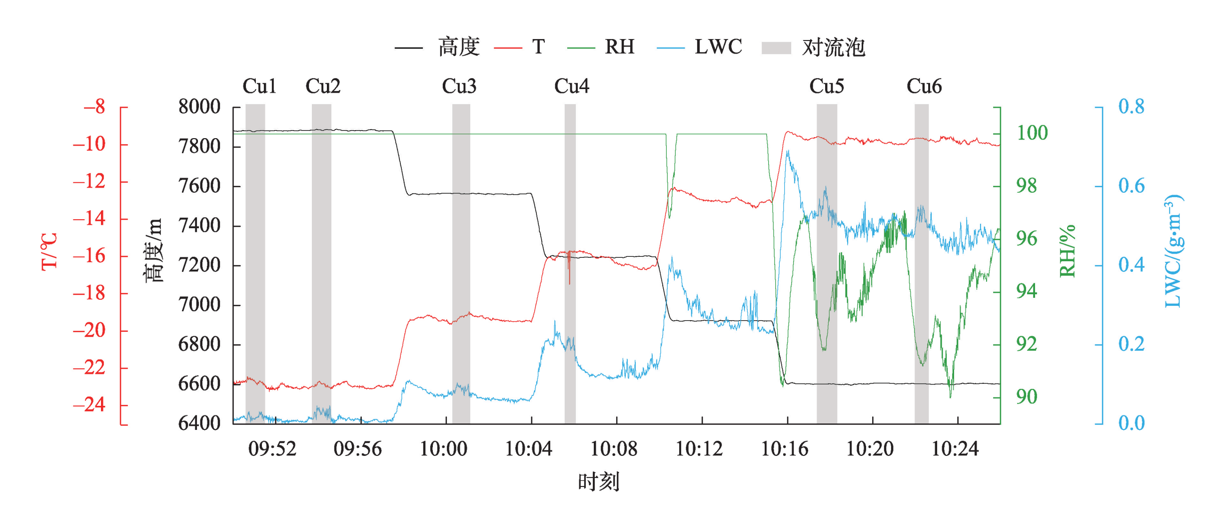


图4　探测阶段中T、高度、RH和LWC随时间变化

Fig. 4　Temperature (T), altitude, relative humidity (RH) and liquid supercooled water (LWC) over time in the detection phase

探测位置为云顶且云顶不均匀，探测区域存在高于周围云体的突出部分。积层混合云云中对流泡位置Cu1和Cu2段除RH外，其他各项物理量值均有明显变化，LWC与云粒子数浓度峰值均有较好的对应关系，Cu1和Cu2内平均LWC为0.07 g·m^{-3}，高出周围0.01 g·m^{-3}，云粒子数浓度在Cu1和Cu2内为138.41 L^{-1}左右，周围云粒子数浓度在17.14 L^{-1}左右，相差达8倍。对流泡内平均有效粒子半径为422.36 μm，周围云中为258.87 μm，相差近2倍。

图6b为7500 m高度，此时段仅探测到一段对流泡，Cu3中平均LWC为0.12 g·m^{-3}，周围层云中平均LWC为0.11 g·m^{-3}，低于对流泡约0.01 g·m^{-3}；对流泡中云粒子数浓度为208.94 L^{-1}，周围层云为20.71 L^{-1}，对流泡中云粒子数浓度高出周围层云约10倍，同时，对流泡中平均有效粒子半径大于周围层云约169.37 μm。

图6c为7200 m探测时段，Cu4中平均LWC为0.24 g·m^{-3}，周围层云中LWC为0.17 g·m^{-3}，对流泡中LWC高出周围层云约0.07 g·m^{-3}。对流泡中云粒子数浓度为139.20 L^{-1}，周围层云为36.95 L^{-1}，高出近4倍。平均有效粒子半径为232.24 μm。另外，此时段层云中云粒子数浓度较低，但在10:07后LWC出现波动，但未出现如Cu1、Cu2和Cu3中LWC和云粒子数浓度较周围有明显变化的情况，因此认为7200 m处为层状云。

图6d为6900 m探测阶段，此时段探测中并没有探测到对流泡，上文提到在7200~6900 m下降阶段中穿过对流泡对应位置在Cu1~Cu4下部，6900 m

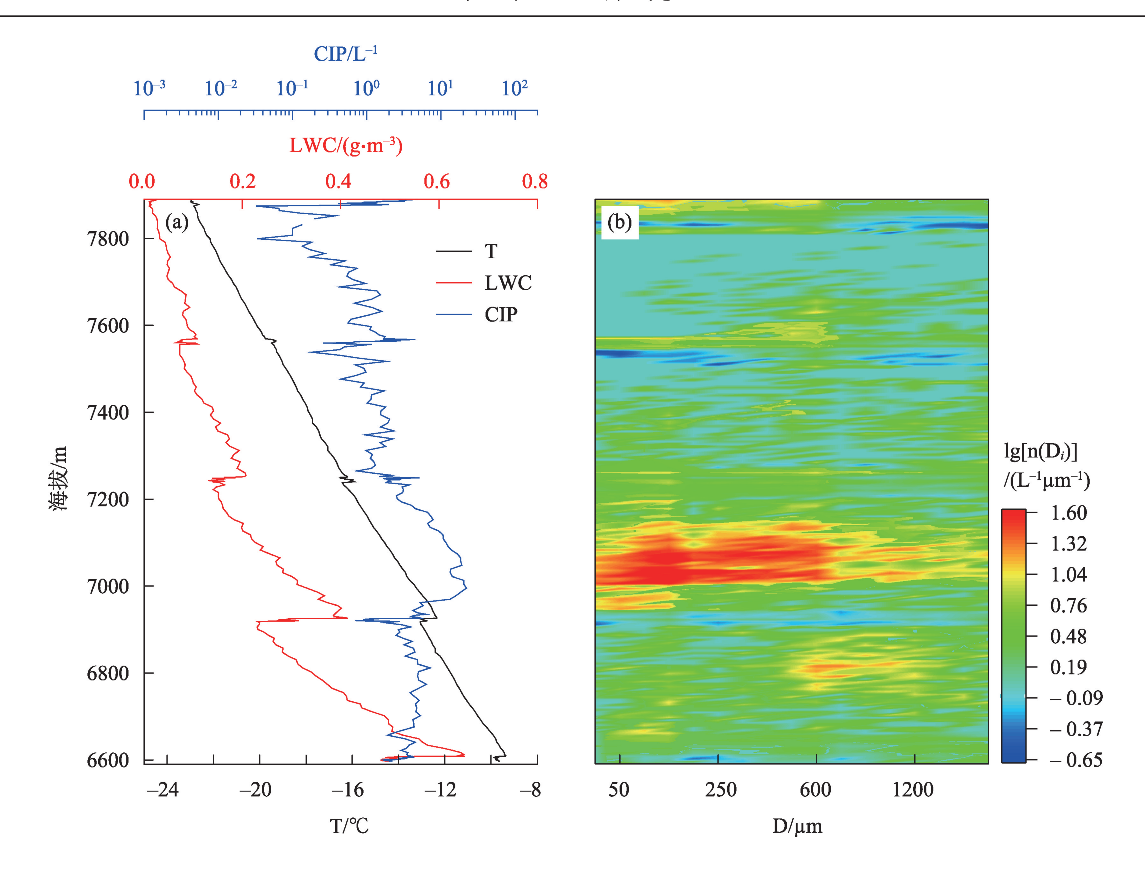


图5 探测阶段平均云粒子浓度、LWC、温度(a)和云粒子浓度谱(b)垂直特征

Fig. 5 Vertical characteristics of the average cloud concentration, LWC, T (a) and cloud particle concentration spectrum (b) during the detection phase

高度上探测飞机未到达该位置。在6900 m高度，云中LWC为0.28 g·m^{-3}左右，平均云粒子数浓度为51.86 L^{-1}，平均粒子有效半径为123.45 μm。

图6e为6600 m探测时段，此时段在相同位置观测到了Cu5和Cu6，该层RH在90%~96%之间，在对流泡区域RH与LWC呈现负相关趋势。对流泡中平均LWC为0.53 g·m^{-3}，高于周围层云0.03 g·m^{-3}。对流泡中平均云粒子数浓度为63.10 L^{-1}，平均粒子有效半径为310.47 μm。周围层云中平均云粒子数浓度为50.11 L^{-1}，平均粒子有效半径为244.17 μm，均小于对流泡。

不同高度下对流泡和周围层云中云微物理量均值如表1所示。本次探测中，云顶T为−23 ℃，观测区内T范围在−23~−9 ℃之间，对流泡内LWC在0.07~0.53 g·m^{-3}，周围层状云LWC在0.06~0.50 g·m^{-3}之间，LWC随高度下降而上升，在观测区域内LWC最高值对应的T为−9 ℃。在探测最低位置6600 m，对流泡与周围层状云在云粒子数浓度上差异并不明显，但在探测最高位置7500 m处，对流泡中云粒子数浓度高出层云中近8倍，平均LWC高出周围层状云0.03 g·m^{-3}。在7850~7500 m处，LWC、云粒子数浓度和有效粒子半径均有明显上升趋势。在7500~6600 m处LWC持续上升，云粒子数浓度和有效粒子半径持续下降，平均RH在6600 m下降到93%。

“播撒-供给”机制中对流泡作为冰粒子的“播种”云，而周围的层云作为对流泡云底部的水汽“供给”云，并且其具备更高的LWC[28]。Plummer等[29]研究冬季大陆性气旋中的对流泡云内外微物理结构表明，云内温度在−31.4~−11.1 ℃时LWC在0.09~0.12 g·m^{-3}之间，高值区可增加至0.14~0.28 g·m^{-3}，最大的LWC出现在温度−16 ℃。张佃国等[30]研究山东地区黄淮气旋背景系统下积层混合云内微物理过程发现，其对流泡内的平均LWC为0.15 g·m^{-3}，对流泡外均值为0.04 g·m^{-3}，对流泡内LWC约为对流泡外的4倍。在本次探测中，温度在−23~−9 ℃之间，对流泡区域云粒子数浓度和LWC有较好的对应关系，平均LWC为0.28 g·m^{-3}，高于层云约0.03 g·m^{-3}。高度逐渐下降时，对流泡内外LWC差异逐渐增大，但并没有出现倍数差异，主要原因可能为探测时间

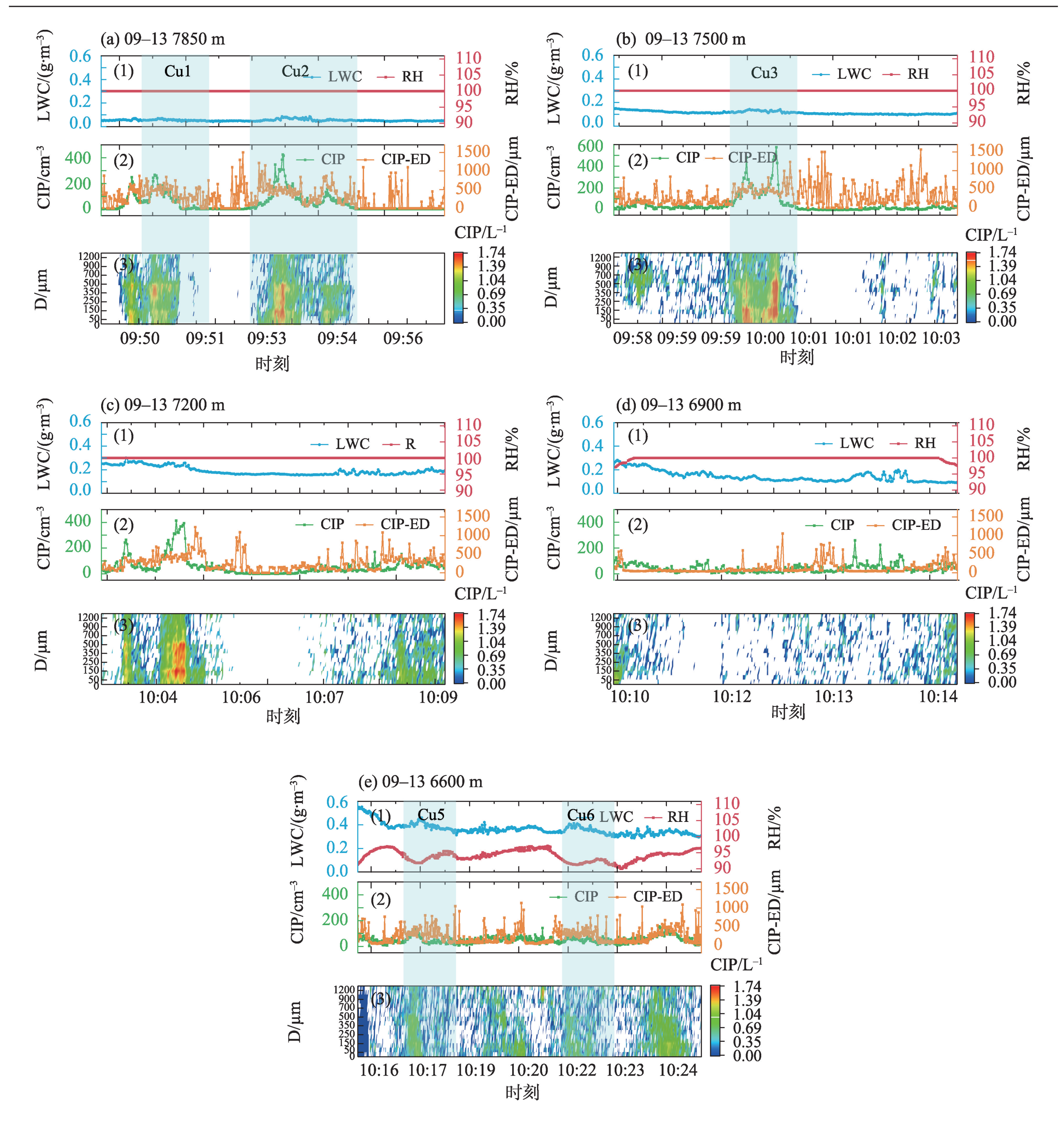


图6 平飞探测阶段不同高度处LWC和RH、ND和ED瞬时谱分布

Fig. 6 Transient spectral distribution of LWC and RH, ND and ED at the different altitude of level flight detection stage

表1 探测过程中不同平飞阶段对流泡与层云云微物理量平均值

Tab. 1 Average values of convection and microphysical quantities of stratus clouds at different levels of flight during the detection process

高度/m	LWC/(g·m⁻³)		RH/%		ND/L⁻¹		ED/μm	
	对流泡	层云	对流泡	层云	对流泡	层云	对流泡	层云
7850	0.07	0.06	100	100	138.41	17.14	422.36	258.87
7500	0.12	0.11	100	100	208.94	20.71	475.03	305.65
7200	0.24	0.17	100	100	139.20	36.95	367.34	298.52
6900	–	0.28	–	100	–	51.86	–	123.45
6600	0.53	0.50	94	92	63.10	50.11	310.47	244.17

在9月13日上午，根据泽库国家气象站数据显示，此次降水从12日夜间开始，13日上午地面温度不足，对流泡发展深度不强。

如图7所示，本次积层混合云粒子谱分布呈三峰型，峰值分别在50 μm、400 μm和1000 μm附近。对流泡内粒子浓度在7500 m处最高，6600 m处最低，7850 m和7200 m处粒子谱分布基本一致。层云中粒子浓度在6600 m处最高，7500 m处最低，最大值与最小值与对流泡内粒子浓度相反。整体而言，除最低高度6600 m外，不同高度下对流泡内粒子浓度均高于层云，但不同高度下对流泡和层云内粒子谱宽基本一致。

图8为平飞探测阶段对流泡内及层状云中CIP-ED、LWC及CIP探测的二维粒子图像分布。由图8可知，积层混合云中规则形状的冰晶较少，部分高度层存在少量的六角板状冰晶和线状粒子，大部分为聚合状的冰相粒子，积层混合云内主要以冰凇附增长和聚并增长机制为主。

7850 m处对流泡与层云粒子均呈板状和聚合状，层云中的粒子明显比对流泡中小，并且对流泡中聚合状粒子占比更高，说明在该高度上水汽扩散较好，以粒子的凝华增长机制和冰晶凇附增长机制为主，对流泡中上升气流更大，聚合状冰晶粒子更多。7500 m处对流泡中以板状、线状和聚合状粒子为主，增长主要以水汽扩散的凝华增长为主，聚合状粒子较7850 m处有所增加，但该高度下层云中没有出现明显的线状粒子，主要以板状和聚合状粒子为主，并且板状粒子粒径与7500 m处基本一致，聚合状粒子有增长的趋势。在7500 m处，对流泡中以凝华增长和冰凇附增长机制为主，在层云中则以冰凇附增长机制为主。6600 m处对流泡中以聚合状粒子为主，从图像可以看出，大部分的粒子超过了CIP可探测的范围，云粒子谱（图6a）表明在该层粒子整体偏少，对应图像说明粒子在该层普遍长大到超过1500 μm。在6600 m处层云中可见少量的板状和针状的冰晶粒子，大部分粒子以聚合状冰晶为主，以凝华增长和冰凇附增长机制为主。

总体而言，高过冷水含量是增强对流泡中凝华和聚集过程的关键，Zhu等[31]观测发现对流泡中枝状结构更为明显，并且粒子相对更大。本研究对流泡中T在−22.6~−9.6 ℃时，云中粒子基本以聚合状和少量针柱状为主，周围层状云粒子相对较小，且可见明显的六角板状结构。

本次探测中7500 m高度处云粒子数浓度最高，有效粒子半径最大。受到飞机最大安全高度和实际飞行条件的限制，探测位置为云顶至云中上层，如图8所示，7800 m处粒子已相对较大，说明上层已有凝结核和云粒子形成，这种现象在李义宇等[32]对山西省层状云的探测中也有发现。云粒子浓度随高度下降，且粒子直径持续下降，但从二维图像上可以看出，云粒子随着高度的下降逐渐变大，且逐渐超出CIP探测量程。但在LWC随高度的下降阶段，云粒子数浓度并没有随之上升，说明在云中存在“播撒–供给”机制。

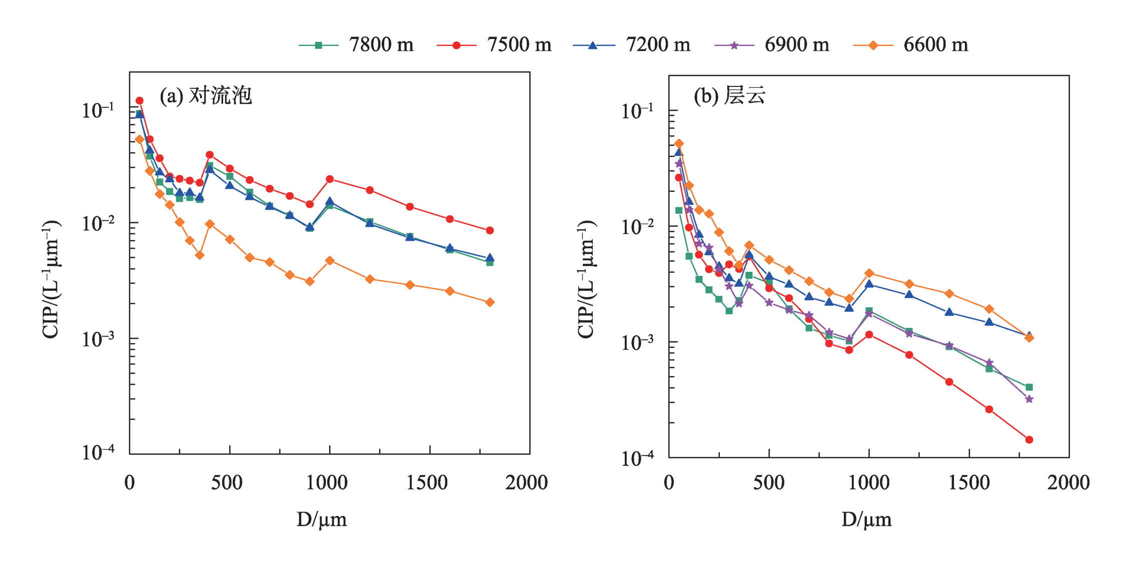


图7 飞机平飞探测时段平均粒子谱

Fig. 7 Average particle spectrum of cloud detection during the aircraft level flight detection period

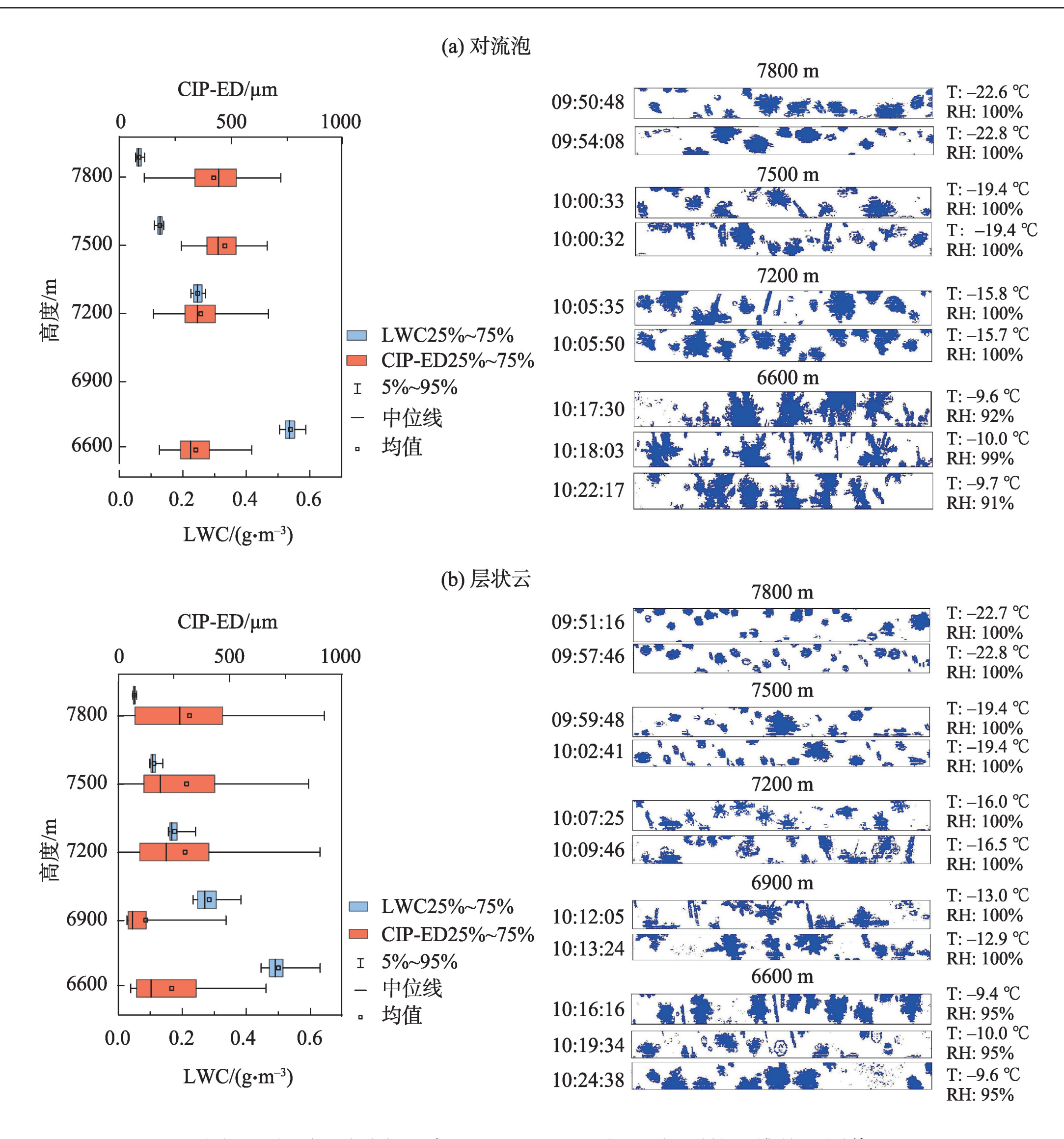


图8 平飞探测时段云中CIP-ED、LWC及CIP探测的二维粒子图像

Fig. 8 CIP-ED, LWC and CIP-probed 2-D particle images in mixed cumulus cloud sand CIP-probed 2-D particle images within level flight detection

3 结 论

本文利用机载DMT云物理探测系统，对2020年9月13日在三江源区一次积层混合云飞机探测数据进行分析，主要结论如下：

（1）积层混合云内T在−23~−10 ℃之间，RH在90%~100%之间，LWC在0.04~0.70 g·m^{-3}，平均ND为53.51 L^{-1}，平均ED为270.47 μm，LWC随高度下降而上升。对流泡中平均ND为115.37 L^{-1}，平均ED为359.69 μm，均高于层云，ND和LWC有较好的对应关系，LWC在0.07~0.53 g·m^{-3}，平均LWC为0.28 g·m^{-3}。周围层状云中LWC在0.06~0.50 g·m^{-3}之间，平均LWC为0.25 g·m^{-3}。因此，在三江源区开展积层混合云飞机人工增雨作业时，播撒窗温度选择在−9~−23 ℃之间，将会更有利于提升播云催化效率，提高催化效果。

（2）积层混合云粒子谱呈现多峰型分布，峰值分别位于50 μm、400 μm和1000 μm。除6600 m外，不同高度下对流泡中云粒子浓度均高于周围层云，不同高度下对流泡和层云内粒子谱宽一致。

（3）积层混合云内主要以淞附增长和聚并增长机制为主，云中规则形状的冰晶较少，部分高度层存在少量的六角板状冰晶和线状粒子，大部分为聚合状冰相粒子。过冷水含量和粒子有效半径随高度的下降而逐渐上升。对流泡和层云中粒子图像差异明显，层云中可见六角板状冰晶，积层混合云

中降水机制符合“播撒-供给”机制。

参考文献(References):

[1] 洪延超. 积层混合云数值模拟研究(I)——模式及其微物理过程参数化[J]. 气象学报, 1996, 54(5): 544-557. [Hong Yanchao. The numerical simulation study of convective-stratiform mixed clouds, Part (I): The model and parameterization of microphysical processes [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1996, 54(5): 544-557.]

[2] 黄敏松, 雷恒池. 云粒子的破碎对积层混合云微物理参量测量的影响[J]. 大气科学, 2021, 45(2): 369-378. [Huang Minsong, Lei Hengchi. Cloud particle shattering and its impact on cloud microphysical parameters measurement in stratiform clouds with embedded convection[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(2): 369-378.]

[3] 何晖, 高茜, 刘香娥, 等. 积层混合云结构特征及降水机理的个例模拟研究[J]. 大气科学, 2015, 39(2): 315-328. [He Hui, Gao Qian, Liu Xiang'e, et al. Numerical simulation of the structural characteristics and precipitation mechanism of stratiform clouds with embedded convections[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(2): 315-328.]

[4] 范烨, 郭学良, 张佃国, 等. 北京及周边地区2004年8、9月层积云结构及谱分析飞机探测研究[J]. 大气科学, 2010, 34(6): 1187-1200. [Fan Ye, Guo Xueliang, Zhang Dianguo, et al. Airborne particle measuring system measurement on structure and size distribution of stratocumulus during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(6): 1187-1200.]

[5] 朱士超, 郭学良. 华北一次积层混合云微物理和降水特征的数值模拟与飞机观测对比研究[J]. 大气科学, 2015, 39(2): 370-384. [Zhu Shichao, Guo Xueliang. A case study comparing WRF-model-simulated cloud microphysics and precipitation with aircraft measurements in stratiform clouds with embedded convection in northern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(2): 370-384.]

[6] 黄美元, 沈志来, 洪延超,等. 半个世纪的云雾、降水和人工影响天气研究进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 536-551. [Hang Meiyuan, Sheng Zhilai, Hong Yanchao, et al. Advance of research on cloud and precipitation and weather modification in the latest half century [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(4): 536-551.]

[7] 洪延超, 李宏宇. 一次锋面层状云云系结构、降水机制及人工增雨条件研究[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1308-1323. [Hong Yanchao, Li Hongyu. Cloud structure, precipitation mechanism and artificial enhancement precipitation condition for a frontal stratiform cloud system[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(5): 1308-1323.]

[8] Plummer D M, McFarquhar G M, Rauber R M, et al. Structure and statistical analysis of the microphysical properties of generating cells in the comma head region of continental winter cyclones. Journal of the Atmospheric Sciences, 2014, 71(11): 4181-4203.

[9] Evans A G, Locatelli J D, Stoelinga M T, et al. The IMPROVE-1 Storm of 1-2 February 2001. Part II: Cloud Structures and the Growth of Precipitation[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2005, 62(10): 3456-3473.

[10] 张佃国, 郭学良, 付丹红, 等. 2003年8—9月北京及周边地区云系微物理飞机探测研究[J]. 大气科学, 2007, 31(4): 596-610. [Zhang Dianguo, Guo Xueliang, Fu Danhong, et al. Aircraft observation on cloud microphysics in Beijing and its surrounding regions during August-September 2003[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(4): 596-610.]

[11] 王元, 牛生杰, 雷恒池. 利用三架飞机联合探测资料分析层积混合云催化物理效应[J]. 大气科学学报, 2017, 40(5): 686-696. [Wang Yuan, Niu Shenjie, Lei Hengchi. An examination of the microphysical responses to aircraft seeding of stratiform clouds with embedded convection using the joint observational data of three aircrafts[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2017, 40(5): 686-696.]

[12] 亓鹏, 郭学良, 卢广献, 等. 华北太行山东麓一次稳定性积层混合云飞机观测研究: 对流云/对流泡和融化层结构特征[J]. 大气科学, 2019, 43(6): 1365-1384. [Qi Peng, Guo Xueliang, Lu Guangxian, et al. Aircraft measurements of a stable stratiform cloud with embedded convection in eastern Taihang Mountain of North China: Characteristics of embedded convection and melting layer structure[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(6): 1365-1384.]

[13] 刘香娥, 高茜, 何晖, 等. 一次积-层混合云系垂直结构和降水机制的飞机观测资料分析与数值模拟[J]. 气象学报, 2020, 78(2): 277-288. [Liu Xiang'e, Gao Qian, He Hui, et al. Analysis of aircraft observation data and numerical simulation of vertical structure and precipitation mechanism of stratiform clouds with embedded convections[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(2): 277-288.]

[14] 高茜, 郭学良, 何晖, 等. 基于飞机观测的华北积层混合云降水微物理特征的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2020, 44(5): 899-912. [Gao Qian, Guo Xueliang, He Hui, et al. Numerical simulation study on the microphysical characteristics of stratiform clouds with embedded convections in northern China based on aircraft measurements[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 44(5): 899-912.]

[15] 孟宪红, 陈昊, 李照国, 等. 三江源区气候变化及其环境影响研究综述[J]. 高原气象, 2020, 39(6): 1133-1143. [Meng Xianhong, Chen Hao, Li Zhaoguo, et al. Review of climate change and its environmental influence on the Three-River Regions[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(6): 1133-1143.]

[16] 赖敏, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 生态建设背景下三江源自然保护区生态系统服务价值变化[J]. 山地学报, 2013, 31(1): 10-19. [Lai Meng, Wu Shaohong, Dai Erfu, et al. Dynamic valuation on ecosystem services to ecological construction in the Three-River Headwa-

ters Nature Reserve[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(1): 10-19.]

[17] 周秀骥, 赵平, 陈军明, 等. 青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2009, 39(11): 1473-1486. [Zhou Xiuji, Zhao Ping, Chen Junming, et al. Impacts of thermodynamic processes over the Tibetan Plateau on the Northern Hemispheric climate[J]. Science China Earth Sciences, 2009, 39(11): 1473-1486.]

[18] 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 青藏高原—季风水汽输送"大三角扇型"影响域特征与中国区域旱涝异常的关系[J]. 气象学报, 2002, 60(3): 257-266. [Xu Xiangde, Tao Shiyan, Wang Jizhi, et al. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau-Monsoon "Large Triangle" affection region and drought-flood abnormality of China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(3): 257-266.]

[19] 傅云飞, 李宏图, 自勇. TRMM卫星探测青藏高原谷地的降水云结构个例分析[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 98-106. [Fu Yunfei, Li Hongtu, Zi Yong. Case study of precipitation cloud structure viewed by TRMM satellite in a valley of the Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(1): 98-106.]

[20] 常祎, 郭学良. 青藏高原那曲地区夏季对流云结构及雨滴谱分布日变化特征[J]. 科学通报, 2016, 61(15): 1706-1720. [Chang Yi, Guo Xueliang. Characteristics of convective cloud and precipitation during summer time at Naqu over Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(15): 1706-1720.]

[21] 王黎俊, 银燕, 姚展予, 等. 三江源地区秋季一次层积云飞机人工增雨催化试验的微物理响应[J]. 气象学报, 2013, 71(5): 925-939. [Wang Lijun, Yin Yan, Yao Zhanyu, et al. Microphysical responses as seen in a stratocumulus aircraft seeding experiment in autumn over the Sanjiangyun National Nature Reserve[J] Acta Meteorologica Sinica, 2013, 71(5): 925-939.]

[22] Field P R, Möhler O, Connolly P, et al. Some ice nucleation characteristics of Asian and Saharan desert dust[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, 6(1): 2991-3006.

[23] 雷恒池, 曾庆存, 李仑格, 等. 从自然控制论看黄河上游人工增雨[J]. 气候与环境研究, 2001, 6(4): 391-399. [Lei Hengchi, Zeng Qingcun, Li Lunge, et al. Investigation of artificial precipitation augmentation at the upper reaches of the Yellow River based on natural cybernetics[J]. Climatic and Environmental Research, 2001, 6(4): 391-399.]

[24] 王宏, 雷恒池, 李书严, 等. 黄河上游河曲地区对流云催化增雨的数值模拟研究[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(4): 619-630. [Wang Hong, Lei Hengchi, Li Shuyan, et al. The seeding experiments of severe convective clouds occurred in the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research, 2004, 9(4): 619-630.]

[25] 李娟, 游来光, 胡志晋, 等. 黄河上游玛曲地区雨滴谱特征的观测研究[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 942-949. [Li Juan, You Laiguang, Hu Zhijin, et al. Analysis on raindrop-size distribution characteristics of Maqu region in upper reach of Yellow River[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(5): 942-949.]

[26] 王黎俊, 孙安平, 刘彩红, 等. 地基微波辐射计探测在黄河上游人工增雨中的应用[J]. 气象, 2007, 33(11): 28-33. [Wang Lijun, Sun Anping, Liu Caihong, et al. Application of ground-based microwave radiometer detection to precipitation enhancement in the upper of the Yellow River[J]. Meteorology, 2007, 33(11): 28-33.]

[27] 王黎俊, 孙安平, 靳少波. 黄河上游河曲地区人工增雨的基本条件[J]. 西北水力发电, 2007, 23(2): 67-70. [Wang Lijun, Sun Anping, Jin Shaobo, et al. Essential conditions and catalyzing operation measures of artificial rainfall in Hequ Region, upper Yellow River[J]. Journal of Northwest Hydroelectric Power, 2007, 23(2): 67-70.]

[28] Rutledge S A, Hobbs P V. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. viii: a model for the "seeder-feeder" process in warm-frontal rainbands[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1983, 40: 1185-1206.

[29] Plummer D M, Mcfarquhar G M, Rauber R M, et al. Structure and statistical analysis of the microphysical properties of generating cells in the comma head region of continental winter cyclones [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2014, 71(11): 4181-4203.

[30] 张佃国, 王烁, 郭学良, 等. 基于机载Ka波段云雷达和粒子测量系统同步观测的积层混合云对流泡特征[J]. 大气科学, 2020, 44(5): 1023-1038. [Zhang Dianguo, Wang Shuo, Guo Xueliang, et al. The properties of convective generating cells embedded in the stratiform cloud on basis of airborne Ka-band precipitation cloud radar and droplet measurement technologies[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 44(5): 1023-1038.]

[31] Zhu S C, Guo X L, Lu G X, et al. Ice crystal habits and growth processes in stratiform clouds with embedded convection examined through aircraft observation in northern China[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2015, 72(5): 2011-2032.

[32] 李义宇, 杨俊梅, 李培仁, 等. 山西省层状云微物理结构探测分析[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 693-703. [Li Yiyu, Yang Junmei, Li Peiren, et al. Detection analysis of microphysical structure of stratiform cloud in Shanxi Province[J]. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(6): 693-703.]

Experimental study on microphysical characteristics of cumulus hybrid clouds in the Sanjiangyuan region in relation to aircraft observation

HAN Huibang[1,2], ZHANG Yuxin[1,2], GUO Shiyu[1,3], TANG Wenting[1,2]

(1. Meteorological Disaster Prevention Technology Center in Qinghai Province, Xining 810000, Qinghai, China; 2. Weather Modification Office of Qinghai Province, Xining 81000, Qinghai, China; 3. Key Laboratory for Disaster Prevention and Mitigation in Qinghai Province, Qinghai, Xining 810000, Qinghai, China)

Abstract: Using data from the physical detection tests of aircraft clouds carried out in the Sanjiangyuan region under the "Second Comprehensive Scientific Research on Qinghai-Tibet Plateau" project, this paper analyzes the macroscopic and microphysical characteristics of a cumulonimbus cloud and its convective bubbles in the Zeku region of Sanjiangyuan on September 13, 2020. The results indicate the following: (1) the temperature inside the cumulus hybrid cloud was between −23 ℃ and −10 ℃, the relative humidity was 90%−100%, and the liquid super-cooled water was between 0.04 $g \cdot m^{-3}$ and 0.70 $g \cdot m^{-3}$; (2) the average particle number concentration inside the convective bubble was higher compared to the surrounding stratus cloud 10^1 L^{-1}, the average effective particle radius was larger, and the average liquid super-cooled water was 0.28 $g \cdot m^{-3}$, which was higher compared to the stratus cloud at about 0.03 $g \cdot m^{-3}$, a better correspondence between the particle number concentration and the liquid super-cooled water. Cloud particle spectra all showed multi-peak distribution, with peaks at 50 μm, 400 μm, and 1000 μm, in line with the distribution characteristics of typical high clouds. (3) The particles in cumulus mixed clouds were mostly aggregated ice crystal particles, and a small amount of hexagonal plate and linear ice crystals existed in some higher layers, with freezing and aggregation growth mechanisms dominating in the clouds and condensation growth dominating in the convective bubbles. The precipitation mechanism in the clouds was consistent with the "sowing-supply" mechanism.

Keywords: aircraft measurement; microphysical characteristics; stratiform cloud with embedded convection; cloud convective generating cells; Sanjiangyuan region